

ENSINO DE EVOLUÇÃO BIOLÓGICA POR UMA PERSPECTIVA INTEGRADORA: UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA FORMAÇÃO INICIAL

Thais Benetti de Oliveira¹

Beatriz Ceschim²

Ana Maria de Andrade Caldeira²

RESUMO

“Como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam o nosso planeta?”. Essa reflexão suscita especulações acerca dos mecanismos de criação e/ou origem das diferentes formas orgânicas existentes ou já extintas do planeta. O darwinismo e a síntese moderna explicam essa diversidade com base nos conceitos de mutação, deriva genética e seleção natural, enfatizando a perspectiva DNA-centrista do processo evolutivo. No entanto, as interações resguardadas entre os genes, organismos e ambientes podem fornecer respostas sobre a concepção da palavra *forjar* no contexto evolutivo. A partir desses questionamentos acerca da diversidade orgânica e da necessidade de inserir essas discussões na formação inicial, elaboramos uma proposta didática cuja metodologia foi baseada no ensino por investigação. Os exercícios propostos fornecem um esteio inicial para a inserção das questões evolutivas contemporâneas nas salas de aula a partir do levantamento de hipótese, discussões e pesquisas subjacentes a uma concepção integrada e sistêmica do conhecimento biológico.

Palavras-chave: Formação inicial. Ensino por investigação. Evolução biológica.

Recebido em: 26/07/2017

Aprovado em: 19/04/2018

¹ Universidade do Sagrado Coração, Bauru, SP, Brasil.

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, SP, Brasil.

BIOLOGICAL EVOLUTION AND CONTEMPORARY RESEARCH: PROPOSAL OF AN INVESTIGATIVE SEQUENCE FOR TEACHER TRAINING

Thais Benetti de Oliveira

Beatriz Ceschim

Ana Maria de Andrade Caldeira

ABSTRACT

“How evolution has forged all the organisms that live in our planet?” This reflection raises speculations about the mechanisms involved in origin or creation of the different existing or extincted organic forms on the planet. Darwinism and the Modern Synthesis explain this diversity based on the concepts of mutation, genetic drift and natural selection, which emphasize the DNA-centrist perspective of the evolutionary process. However, interactions among genes, organisms and environments can provide answers for the meaning of the word *forge* in the evolutionary context. From these questions about the organic diversity and the need to introduce these discussions in the teacher training, we developed a didactic proposal whose methodology was based on teaching by research. The exercises can provide an initial mainstay for insertion of discussions about contemporary evolution’s questions in classrooms from the hypothesis, discussions and research whose approach is the integrated and systematic design of biological knowledge.

Keywords: Teacher training. Teaching by research. Biological evolution.

Received on: 26/07/2017

Approved on: 19/04/2018

O CARÁTER INTEGRADO DA EVOLUÇÃO BIOLÓGICA: POR QUE CONSIDERAR ESSA ABORDAGEM NA FORMAÇÃO INICIAL EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS?

A dimensão epistêmica

A profusão das formas orgânicas existentes e já extintas no planeta Terra é uma inquietação bastante pungente entre os naturalistas e biólogos evolutivos desde Aristóteles, Lamarck, Charles Robert Darwin (1809-1882), em *The origin of species (A origem das espécies – 1872)*, e que permanece viva até os dias atuais. A ubiquidade dessas formas é surpreendente e suscita questões acerca dos mecanismos que puderam e podem gerar e criar tamanha diversidade.

Darwin apresentou evidências e propostas explicativas relevantes para essa diversidade. Para o naturalista, a seleção natural seria a responsável pelas adaptações dos seres vivos. A Teoria Sintética reafirma os pressupostos darwinianos, enfatizando o papel da seleção natural na fixação de formas orgânicas, além de descrever os mecanismos de deriva genética e mutação gênica. No entanto, as mutações e a alteração da frequência gênica nas populações como resultado de processos seletivos não constituem a única explicação para a diversidade orgânica.

O entendimento acerca da diversidade, mesmo em diferentes contextos de produção do conhecimento científico sobre evolução biológica (darwinismo, Teoria Sintética e as ideias contemporâneas sobre Evo-Devo³ e Eco-Evo-Devo⁴), é, constantemente, colocado como alvo de derivações heurísticas e epistemológicas. Por exemplo, a regulação gênica que ocorre durante a ontogenia e as condições ambientais que incitam mudanças fenotípicas conspícuas não foram consideradas pelo darwinismo e pela Teoria Sintética, dado o contexto em que foram produzidas.

Embora o darwinismo e a Teoria Sintética atribuam uma função ao ambiente, essa função está estritamente associada à concepção de seletor das variantes fenotípicas ou uma espécie de “peneira”, sem considerar, portanto, a ideia de que as mudanças ambientais estejam

³ Biologia Evolutiva do Desenvolvimento (CARROLL, 2006).

⁴ Biologia Evolutiva Ecológica do Desenvolvimento.

envolvidas na indução de novos fenótipos, estabelecidos ao longo do desenvolvimento do organismo – ver mais em Oliveira (2015) e em Ceschim, Oliveira e Caldeira (2014).

Essa ideia adquiriu visibilidade na comunidade científica devido ao crescente número de estudos sobre plasticidade fenotípica e descobertas referentes aos processos regulatórios que orquestram o desenvolvimento e aos demais mecanismos epigenéticos envolvidos (LOFEU; KOHLSDORF, 2015). A plasticidade fenotípica apresenta estudos de como a ecologia de um organismo afeta o desenvolvimento dele e como o desenvolvimento de um organismo influencia a ecologia e a evolução dele. Ao caracterizar e compreender a interconexão entre o ambiente de um organismo, as respostas de desenvolvimento que ele dá e interações ecológicas que desenvolve em populações naturais, é possível esclarecer ainda mais o papel do meio ambiente, não apenas selecionando entre fenótipos diversos, mas também induzindo tais fenótipos (LEDÓN-RETTIG; PFENNIG, 2011).

A Biologia Evolutiva Ecológica do Desenvolvimento, também conhecida como Eco-Evo-Devo, tem como objetivo precípuo decifrar as regras subjacentes às interações entre o ambiente de um organismo, os genes e o desenvolvimento e incorporar tais regras à teoria evolutiva. Parte-se dos pressupostos de que o ambiente é uma fonte e um indutor da variação fenotípica em múltiplos níveis da organização biológica enquanto o desenvolvimento atua como um regulador que pode mascarar, liberar ou criar combinações de variação. A seleção natural pode subsequentemente fixar tal variação (ABOUHEIF *et al.*, 2014).

A incorporação de enunciados que tratam do papel do ambiente como indutor de fenótipos é importante porque as contingências de seleção natural não atuam nos fatores hereditários em si mesmos, mas no organismo que se desenvolve de ovos fertilizados até adultos que se reproduzem. Cada organismo durante o período ontogenético irá responder de algumas maneiras ao estresse ambiente ao qual está submetido. A seleção natural confere perpetuação àqueles indivíduos nos quais a resposta é aquela com o maior valor adaptativo (ABOUHEIF *et al.*, 2014).

Defensores da perspectiva da Eco-Evo-Devo reconhecem o fato de que organismos estão continuamente sujeitos à mudança ambiental, alterando quer seja em nutrição quer seja em temperatura, predação, competidores ou vários desses simultaneamente. Admite-se que há traços fenotípicos que podem estar sob determinação completa do controle genético

(exemplo: traços mendelianos), mas a maioria dos traços é plástica e resulta de uma complexa interação entre influências genéticas e ambientais (ABOUHEIF *et al.*, 2014).

Pode-se entender que o papel do ambiente é duplo: por meio da ação da seleção natural, certos fenótipos serão selecionados em certos ambientes, mas, simultaneamente, o ambiente pode induzir a variação fenotípica por meio de plasticidade, assim tornando claro o papel duplo do ambiente, que pode criar um ciclo de *feedback* que concomitantemente influencia a evolução do traço, selecionando variações e induzindo tais variações (ABOUHEIF *et al.*, 2014).

A partir dessa compreensão, percebe-se que a ocorrência do desenvolvimento se vincula não só a processos internos do organismo, mas também às condições do meio que podem alterar a forma de ação dos processos de expressão fenotípica.

Na embriologia clássica, o foco das pesquisas e abordagens teóricas refere-se à dinâmica interna por meio da qual os genes do núcleo das células de um indivíduo produzem o fenótipo do organismo. No século passado, descobriu-se que a comunicação entre as células é a chave desse fenômeno (GILBERT; EPEL, 2009).

Sozinha, a informação genética contida no núcleo das células não pode, diretamente, produzir a diferenciação dos muitos tipos de células em um organismo multicelular. As células interagem entre si, e essa interação revela instruções sobre os modos de diferenciação de cada uma delas. Os sinais moleculares chamados de fatores parácrinos são liberados por um conjunto de células e induzem mudanças na expressão genética nas células adjacentes a elas. Essas células adjacentes (ou vizinhas), com as características recém-adquiridas, produzem os próprios fatores parácrinos que podem mudar a expressão genética de sua vizinhança – às vezes, incluindo as células que originalmente induziram a mudança nelas mesmas (GILBERT; EPEL, 2009).

A plasticidade fenotípica é importante para o entendimento da Eco-Evo-Devo porque esse mecanismo possibilita a observação de uma relação explícita entre a variação fenotípica, a seleção natural e a interferência ambiental. A plasticidade implica que a seleção pode operar em vários estágios da ontogenia, e isso fornece uma chave explicativa para as circunstâncias em que as populações reagem rapidamente às condições de mudanças ambientais (MÜLLER, 2007).

Seria possível, portanto, que a origem de todas as formas orgânicas que habitam o nosso planeta fosse resultado da ação única e resolvida da perspectiva genética? Ou a evolução teria forjado outros mecanismos específicos, o que tornou possível a geração de tamanha diversidade?

A importância do título do livro de Sean Carroll (2006) *Infinitas formas de grande beleza: como a evolução forjou a quantidade de criaturas que habitam o planeta* – um dos autores que escreveram sobre a biologia do desenvolvimento – foi a motivação inicial para um estudo analítico acerca de conteúdos epistêmicos e empíricos da Biologia Evolutiva, especificamente no que se refere à origem e à diversidade das formas orgânicas no tempo evolutivo.

Embora o DNA-centrismo seja característico das explicações sobre a origem e a produção da diversidade orgânica desde 1920, essa perspectiva não fornece subsídios para um entendimento completo, atualizado e integrado da Biologia Evolutiva, bem como sobre as especificações de controle causal do processo evolutivo.

Atualmente, a abordagem molecular-centrista que caracterizou o contexto de produção teórica e empírica da Biologia Evolutiva passa a ser especulada por filósofos e biólogos que propugnam sobre a ideia de que não exclusivamente a seleção natural, mas também diversos outros mecanismos evolutivos têm papel causal e explicativo na evolução dos seres vivos. Essa ideia e/ou designação respalda um cenário diferente às explicações sobre a evolução e pauta-se em um pluralismo de processos que atua complementar e sincronicamente para a ocorrência do processo evolutivo (PIGLIUCCI, 2007; ALMEIDA; EL-HANI, 2010; GILBERT; EPEL, 2009).

O avanço das pesquisas na área da embriologia forneceu dados significativos referentes ao modo de operação da expressão gênica e à maneira como esse processo origina novas formas orgânicas. A existência de um “*kit* de ferramentas” comum aos organismos distantes filogeneticamente fundamenta a ideia de que o mais importante para a diversidade não é o conteúdo ou a quantidade de variedade sequencial do *kit* de ferramentas genéticas de um animal, e sim a maneira como elas são usadas. A construção das formas depende da ativação e da desativação de determinados genes em diferentes momentos e posições ao longo da embriogênese. Logo, as diferenças na forma também surgem de alterações evolutivas de determinados genes nesses locais e momentos, sobretudo daqueles que afetam o número, o formato ou o tamanho de uma estrutura. As diversas maneiras por meio das quais um gene

pode ter a utilização alterada criam uma enorme variedade nas arquiteturas corporais e na organização de cada estrutura (CARROLL, 2006). Jablonka e Lamb (2010) argumentam que as sequências gênicas operam de formas diferentes dependendo do que é “ligado” e “desligado” ao longo da sequência nucleotídica considerada. Assim, diferenças morfológicas consideráveis podem surgir a partir de sequências idênticas.

Antes da relação entre biologia molecular, embriologia e evolução ser entendida à luz de uma perspectiva integradora, os biólogos conjecturavam que organismos filogeneticamente distantes teriam constituições genéticas muito diferentes. Entretanto, pesquisas moleculares realizadas na década de 1980 evidenciaram o contrário: os genes responsáveis pela organização da constituição corporal dos organismos possuem homólogos na maioria dos animais (CARROLL, 2006). Desde então, pesquisas fundamentadas em testes no nível da biologia molecular foram utilizadas para determinar funcionalidades de genes organizadores, semelhanças moleculares entre grupos animais e implicações evolutivas de tais funcionalidades e semelhanças.

Ainda na década de 1980, uma evidência fundamental para o entendimento da relação entre ontogenia e evolução foi apresentada: a existência dos genes organizadores do processo embriológico (CARROLL, 2006). Tais genes que controlam o desenvolvimento foram denominados genes *Hox*. O controle de outros genes, exercido pelos genes controladores é mediado por fatores de transcrição – proteínas capazes de se ligar a trechos de DNA para regular a intensidade de expressão de genes.

Os genes *Hox* foram primeiramente encontrados e caracterizados na mosca-da-fruta, a *Drosophila melanogaster*. Posteriormente, genes *Hox* de insetos, vermes e mamíferos também foram estudados com mais detalhes. O conhecimento proveniente dos estudos dos genes *Hox* de diferentes grupos animais permitiu a comparação dos padrões de expressão, o que caracterizou uma das primeiras tentativas sistematizadas para compreender a base molecular da evolução dos padrões de desenvolvimento (GELLON; MCGINNIS, 1998).

A variação da regulação de genes *Hox* é apontada como uma das causas para o surgimento de novos planos corporais em diferentes táxons animais (GELLON; MCGINNIS, 1998). Os componentes genéticos responsáveis pelas construções corpóreas são comparados a um *kit* de ferramentas composto por fatores de transcrição e sinalizadores que controlam o desenvolvimento animal. O que determina o resultado final do trabalho realizado por meio

do *kit* de ferramentas genéticas não é a constituição desse *kit*, mas o modo de utilização dele (CARROLL, 2006).

Para ilustrar a importância do estudo dos genes do *kit* de ferramentas, um exemplo será apresentado: o gene chamado FOXP2, que atua na vocalização de vertebrados. Segundo Reece *et al.* (2015), evidências que apontam para a relação entre o FOXP2 e a emissão sonora são: (a) mutações nesse gene causam sérios problemas de fala e linguagem em seres humanos e (b) a expressão desse gene em mandarins e canários ocorre quando tais aves estão aprendendo a cantar. A comparação do gene FOXP2 entre humanos e chimpanzés levou à conclusão de que há dois aminoácidos diferentes – um aspecto provavelmente relacionado com a capacidade de fala no humano. Uma cópia do gene FOXP2 “humanizada” foi incluída em um camundongo de forma a substituir o FOXP2 próprio do camundongo pela versão humana. As diferenças de vocalizações no camundongo foram sutis, e foram observadas algumas diferenças nos circuitos celulares no cérebro (que passaram a se assemelhar aos circuitos humanos). Neandertais foram apontados como seres incapazes de falar, porém, por meio da análise do gene FOXP2, foi possível a elaboração da hipótese de que, sim, neandertais foram capazes de falar, pois o FOXP2 codifica uma proteína idêntica à humana (REECE *et al.*, 2015). Mais estudos podem ser realizados, mas a constatação da semelhança do gene em humanos e neandertais é uma importante evidência para direcionar estudos posteriores.

Genes controladores da embriogênese de drosófilas possuem homólogos exatos na maioria dos animais, inclusive no homem (CARROLL, 2006). A comparação de tais genes é uma área de pesquisa com investigação em andamento, e muito ainda se poderá concluir por meio da análise de representantes dos filos animais. Para exemplificar a complexidade envolvida: evidências apontam para a ideia de que organismos modelo, como *Drosophila melanogaster* e *Caenorhabditis elegans*, podem ter sofrido uma grande quantidade de perda de genes porque há uma porcentagem de genes humanos que possuem mais homólogos em anêmona do mar (*Nematostella vectensis*) que em qualquer dos organismos modelo acima mencionados (JARVELA; PICK, 2016).

Como pontuam Jarvela e Pick (2016), os genes do *kit* de ferramentas foram inicialmente identificados em um pequeno número de organismos modelo, como *D. melanogaster* e *C. elegans*, que não representam a diversidade existente entre os metazoários. Como resultado, tem-se estudado um conjunto restrito de genes conservados em uma pequena amostra da diversidade de animais disponíveis. Segundo os autores, grupos de animais como Porifera,

Cnidaria, e Ctenophora são especialmente importantes para a compreensão das origens dos processos de desenvolvimento.

Portanto, o DNA-centrismo acima referido e, de certo modo, questionado com relação à ênfase no ensino de evolução, está associado à acepção epistemológica de que, na maioria das vezes, a ação gênica apreende. Não descartamos a participação dos genes na origem de novos fenótipos, mas (re)contextualizamos a expressão gênica como sendo o resultado, também, de interação e sincronização complexas, dinâmicas e imprevisíveis em espaços e tempos específicos, subjacentes tanto à dimensão ontogenética quanto à ecológica. Não se trata, portanto, de subverter ou sucumbir a ação gênica nos encaminhamentos centrais da evolução, mas, de considerá-la dentro de uma perspectiva epistemológica mais ampla e integrada.

A partir da interação entre ontogenia, genética e ecologia, abre-se um leque de possibilidades para uma abordagem integrada e pluralista da biologia cuja compreensão é uma das chaves explicativas para tamanha profusão das formas orgânicas existentes e já extintas. A perspectiva pluralista contempla campos de pesquisa a partir dos quais pode-se compreender a existência de diversos mecanismos operando de modo complementar no processo evolutivo.

Exposta essa breve justificativa epistêmica do trabalho, nossa segunda preocupação incide na dimensão didática. Como todos esses aportes acerca da Biologia Evolutiva podem ser abordados na formação inicial, especificamente em cursos de Ciências Biológicas? De que forma é possível transpor didaticamente essa abordagem para esse nível de ensino?

A justificativa epistêmica do conteúdo deste trabalho fundamenta a estrutura da proposta didática que será apresentada: faz-se necessária a elaboração de atividades que abarquem a importância da perspectiva genética e da seleção natural nos processos evolutivos (e contemplem os pressupostos teóricos da Teoria Sintética e do darwinismo), mas também que tangenciem a pluralidade de fatores (interação gene-organismo-ambiente) necessária à explicação sobre diversidade morfológica.

Este estudo objetiva, portanto, propor articulações epistemológicas e pedagógicas, no que concerne às possibilidades didático-metodológicas-especificadas pelo ensino por investigação – e a natureza integrada do conhecimento biológico – representada por uma abordagem evolutiva cujo âmago são as relações entre gene, organismo e ambiente. Para tanto, sistematiza-se uma Sequência de Ensino Investigativo (SEI) elaborada com base em

pesquisas evolutivas contemporâneas a partir da qual os alunos possam compreender, durante o processo investigativo, a inadequação de entendermos a evolução apenas a partir da dimensão genética.

A proposta apresenta uma possibilidade prática que poderá ser realizada nos cursos de formação de pesquisadores e professores de Biologia e, então, contribuir para a inserção das pesquisas contemporâneas nas salas de aula.

UMA POSSIBILIDADE DE ARTICULAÇÃO ENTRE A DIDÁTICA E A EPISTEMOLOGIA DA BIOLOGIA: UMA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVO (SEI) COMO ESTRATÉGIA PEDAGÓGICA PARA A ABORDAGEM INTEGRADA DA EVOLUÇÃO BIOLÓGICA

A organização, a sistematização e a proposição epistêmica e prática do conhecimento escolar é transitória e obedece às demandas formativas impostas pela sociedade. O cenário contemporâneo apresenta-nos o desafio de uma educação científica cujo objetivo seja baseado na autonomia, na capacidade de intervir na sociedade em diferentes contextos, na aprendizagem permanente, na aprendizagem pela descoberta e na aquisição de habilidades cognitivas complexas. Não se trata de detratar o ensino tradicional fundamentado na aprendizagem conceitual e em metodologias como a aula expositiva, mas de adicionar a esse cenário questões metodológicas que reposicionam o papel do professor e do aluno e ampliam os objetivos da aprendizagem.

O ensino de Biologia também precisa de (re)adequações, já que se trata de uma ciência constituída por uma rede conceitual complexa e dinâmica que integra conceitos pertencentes a dimensões espaciais distantes, porém, processualmente, interdependentes e sincrônicos – gene, organismo e ambiente. A construção de problemas pode facilitar que o aluno visualize essa integração e, portanto, deixe de entender a Biologia como resultado de conhecimentos estanques e um conjunto de termos e/ou nomes complexos a serem decorados arbitrariamente.

A metodologia adotada para a proposição das atividades é baseada na elaboração de uma SEI. A partir dos exercícios propostos, objetiva-se explorar as habilidades de formulação de hipóteses, investigação, análise de resultados e elaboração e/ou estruturação de sugestões de soluções (POZO; CRESPO, 1998).

Muitos autores (POZO; CRESPO, 1998; PERALES, 2000; OÑORBE, 2003) apontam a resolução de problemas como estratégia que pode auxiliar a aprendizagem dos conteúdos científicos. Para Perales (2000, p. 9), essa estratégia “ocupa, sem dúvida, um lugar central no processo de ensino-aprendizagem”, pois responde “aos pressupostos teóricos de maior peso na configuração atual da didática das ciências” (PERALES, 2000, p. 17) e se constitui em “um recurso que auxilia a construção de conceitos, procedimentos e atitudes relacionados a essa disciplina” (NUÑEZ *et al.*, 2004, p. 145).

A aprendizagem de conteúdos científicos acontece de forma mais efetiva quando habilidades específicas da área são necessárias para a resolução de problemas, pois “os trabalhos de pesquisa em ensino mostram que os estudantes aprendem mais sobre ciência e desenvolvem melhor seus conhecimentos conceituais quando participam de investigações científicas, semelhantes às feitas nos laboratórios de pesquisa” (HODSON, 1992 *apud* AZEVEDO, 2004, p. 19).

As práticas educativas baseadas no ensino de ciências por investigação têm sido destaque nos estudos que propõem, implementam e avaliam atividades didático-pedagógicas de ensino de Ciências (SOLINO; GEHLEN, 2014). Essa abordagem é baseada no diálogo e na discussão de problemas e contempla processos investigativos de elaboração de hipóteses, verificação, socialização de resultados e argumentação (ZÖMPERO; LABURÚ, 2011).

No âmbito da formação inicial, podemos fazer o uso das propostas investigativas para incorporar as pesquisas contemporâneas aos debates da área. Dessa forma, elaboramos uma aproximação metodológica e heurística da articulação entre o conhecimento teórico e o empírico legitimada nos percursos gradativos da construção do conhecimento.

A partir dessa aproximação com a construção da atividade científica e com a natureza da ciência, no ensino por investigação, a gênese do problema está relacionada aos conhecimentos científicos trabalhados em sala de aula. O objetivo dessa abordagem é possibilitar a apreensão dos conceitos pelos alunos, ao mesmo tempo em que compreendem o processo de construção desse conhecimento. É notório que a aprendizagem em ciências carrega um problema de dimensão conceitual, muitas vezes atribuído à memorização excessiva e desconexa de termos biológicos. A inserção desse termo em um contexto de produção científica, de descoberta científica e de relação com o cotidiano (re)significa o modo de apreensão do conteúdo científico pelo aluno, de modo que a aquisição do conceito necessite ser construída pelos alunos durante

o processo de ação investigativa, na realização dos procedimentos e passos necessários para a resolução do problema proposto – que não, necessariamente, é experimental (CARVALHO, 2011). A partir desses caminhos, o aluno tem a possibilidade de construir conhecimentos por meio de elaboração de hipóteses, organização e busca de explicações para os fenômenos da natureza.

Há, ainda, uma preocupação eminente em demonstrarmos as articulações existentes entre os contextos de produção de conhecimento, o que inviabiliza a obsolescência ou a ruptura com ideias anteriores em detrimento de conhecimentos novos e inéditos, os quais sucumbem com o passado, sem valorizar a ideia de relação, de construção paulatina, de avanço nas possibilidades de subsídios empíricos.

A partir de um tema bastante relevante em diferentes contextos – a diversidade biológica –, os alunos terão a possibilidade de articular o conhecimento prévio – seja o científico, oriundo do darwinismo e da Teoria Sintética, seja o de contextos em que a diversidade e a preservação orgânica são discutidas em outros termos ou instâncias – a partir de uma visão integrada dos níveis biológicos. Abaixo, segue a sequência dos problemas elaborados como proposta didática e epistemológica de todo o referencial apresentado.

Problema 1

A mutação é um mecanismo fundamental para a existência da diversidade orgânica. Ela possibilita, por meio da mutação gênica, o surgimento de novas sequências nucleotídicas (por deleção, inversão ou translocação, por exemplo) ou, ainda, possibilita, por meio de mutações cromossômicas numéricas, a perda ou a adição de cromossomos ou de conjuntos cromossômicos inteiros quando há alteração da ploidia celular (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2012).

A recombinação gênica, embora não produza genes inéditos, permite que novas combinações de genes sejam geradas a partir dos já existentes. Dois mecanismos podem promover essa recombinação na formação de gametas meióticas: a segregação independente e o *crossing-over*. Também nas próximas gerações, os mesmos mecanismos propiciam novas combinações quando conjuntos cromossômicos homólogos se juntam a partir da fecundação. Na meiose, apenas um cromossomo de cada par vai para o gameta. Assim, podem ser formados vários tipos de gametas, cada qual com uma combinação diferente de cromossomos maternos e paternos (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2012).

Em um indivíduo diploide no qual $2n = 6$ (ou seja, há três pares de cromossomos homólogos), há quatro possibilidades de segregação. Assim, podem ser formados oito tipos de gametas diferentes (2^3).

Na espécie humana, por exemplo, há 23 pares de cromossomos na célula diploide, o gameta (óvulo ou espermatozoide). Isso significa que pode haver 2^{23} tipos de gametas, ou seja, 8.388.608 tipos! Como esse raciocínio se aplica para o homem e para a mulher (uma vez que o número diploide da espécie é restituído pela fecundação), um casal poderia originar, a partir da fecundação, $8.388.608^2$ encontros gaméticos diferentes, ou seja, aproximadamente 70 trilhões de descendentes geneticamente distintos. Assim, seria fácil entender porque dois irmãos, apesar de serem filhos dos mesmos pais, são geneticamente únicos e podem, às vezes, não ser nada semelhantes (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2012).

Ao aplicar esse raciocínio para as diferentes espécies existentes – de acordo com o número diploide peculiar de cada espécie, percebe-se que essa possibilidade de variedade genética existe – mesmo que em maior ou menor número – em todas as espécies.

- a. A partir do descrito, pode-se pensar que toda a diversidade orgânica existente é e/ou foi gerada apenas graças às inovações e recombinações gênicas. Você concorda com essa afirmação? Por quê?

Objetivo/justificativa: iniciar uma primeira reflexão sobre as possibilidades de geração de diversidade fenotípica. Embora a mutação e a recombinação sejam fundamentais para tal ação, seriam os únicos responsáveis?

- b. Para repensar as relações entre genótipo-fenótipo-ambiente e a geração de diversidade orgânica, descreva como são determinadas as diferenças morfológicas entre folhas submersas e folhas emersas da espécie *Cabomba caroliniana* (REECE *et al.*, 2015). Descreva como ocorre o padrão de crescimento da trepadeira tropical *Syngonium (Araceae)*, o qual pode ser consultado em Lewontin (2002). Após as descrições, explique a importância de se considerarem contingências ontogenéticas (para além de explicações referentes às diferenças genéticas) que fazem interagir fatores internos e externos ao organismo na determinação da diversidade fenotípica.

Objetivo/justificativa: fornecimento de exemplos biológicos concretos, nos quais a plasticidade fenotípica é determinada por padrões de expressão gênica que são determinados por

contingências ambientais. As diferenças intraespecíficas dos indivíduos serão explicadas pelas contingências ontogenéticas concretas pelas quais passaram.

Problema 2

A coluna vertebral de alguns animais se difere quanto ao número de cada tipo de vértebra. Essa diferença resulta em pescoços longos (gansos), em pescoços curtos (camundongo) ou na ausência de pescoço (cobras). Estudos revelam que um gene (*Hoxc6*), expresso na coluna vertebral, sinaliza qual será o limite entre vértebras cervicais e torácicas. Assim, a morfologia do pescoço depende do local de expressão do gene (mais próxima ou distante da cabeça). Nas cobras, o gene *Hoxc6* é expresso tão perto da cabeça que não se formam vértebras cervicais e, portanto, elas não apresentam pescoço. Em gansos, o mesmo gene é expresso longe da cabeça, e o pescoço compreende a extensão das primeiras 22 vértebras (EL-HANI; MEYER, 2009).

A partir desse trecho, pode-se refletir sobre o fato de que a natureza da biologia opera de forma tão sincronizada que viabilizou a existência de percursos “econômicos”, a partir dos quais, uma infinidade de formas pôde ser criada, sem a necessidade de um caminho – sequências de nucleotídeos – completamente inédito. François Jacob (*apud* EL-HANI; MEYER, 2009) propôs uma analogia pertinente para referir-se a esses “reaproveitamentos” ou cooptações, afirmando que a evolução pode operar, também, graças ao mecanismo de bricolagem.

- a. A bricolagem é a atividade de construção de algo, usando como matéria-prima peças preexistentes. Como você justificaria essa analogia atribuída ao processo evolutivo, pensando nos mecanismos de expressão gênica e na diversidade de formas orgânicas?
- b. Fundamentado no exemplo do gene *Hoxc6*, elabore uma argumentação escrita que explique a inadequação de se atribuir à dimensão das diferenças genéticas entre seres vivos a causa para qualquer traço morfológico ou fisiológico observado; ou seja, explique o motivo de nem sempre ser verdadeira a afirmação de que um traço vivo se difere de um organismo para outro (ou de uma espécie para outra), porque há diferença genética para aquele traço nos diferentes seres vivos analisados.

Objetivo/justificativa: levantamento de hipóteses sobre possíveis mecanismos de origem de diversidade orgânica; discussões e reflexões de que fenótipos diferentes podem ser gerados

por sequências nucleotídicas similares ou idênticas, de acordo com a sincronização espaço-temporal da expressão genética; encaminhamento para uma conclusão acerca de o fenótipo observado ser causado por fatores que não sejam, exclusivamente, a sequência específica dos nucleotídeos.

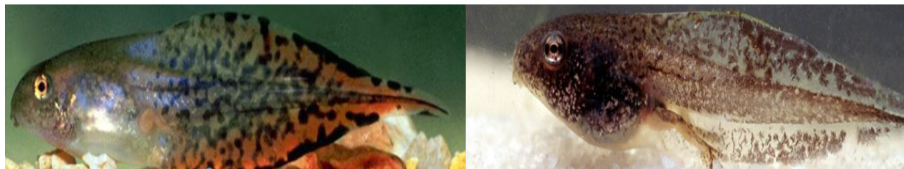
Problema 3

A partir do exercício anterior, identificam-se as diversas maneiras por meio das quais um gene pode ter a ação dele alterada, possibilitando uma variedade nas arquiteturas corporais e, portanto, viabilizando outros mecanismos que também integram as explicações sobre a variedade de formas orgânicas existentes.

Por exemplo, um único genótipo pode produzir muitos fenótipos, dependendo das muitas contingências encontradas durante o desenvolvimento. O fenótipo é o resultado de complexos eventos do processo de desenvolvimento, influenciados tanto pelos fatores ambientais quanto pelos genes (NIJHOUT, 1991).

Imagine um jovem organismo aquático desenvolvido em uma lagoa específica. Esses organismos são capazes de sentir os bioquímicos solúveis na água – os produtos liberados pela saliva ou urina dos seus principais predadores. Na presença desses sinais, o padrão de desenvolvimento da presa é alterado e resulta em um fenótipo que minimiza a probabilidade de predação. Quando as larvas de libélula estão presentes, os girinos *Hyla chrysoscelis* e *H. versicolor* – presas dessas larvas – desenvolvem caudas vermelhas brilhantes, as quais desviam a atenção dos predadores, e um conjunto de músculos do tronco que lhes possibilita uma locomoção mais ágil e permite a eles escapar dos predadores (GILBERT; EPEL, 2009).

Figura 1 – Diferença fenotípica da *Hyla chrysoscelis* em polifenismo, induzida pela presença de predador.



Legenda: À direita um girino na presença de predador e, à esquerda, um girino na ausência de predador.

Fonte: Gilbert e Epel, 2009, p. 4.

A partir desses exemplos, faça uma pesquisa e descreva três novos exemplos que caracterizam a possibilidade de geração de diversidade fenotípica por mecanismos distintos da mutação, da recombinação gênica e da seleção natural.

Discuta os exemplos trazidos com os colegas e aponte os mecanismos pesquisados por cada grupo.

Objetivo/justificativa: levantamento de hipóteses sobre possíveis mecanismos de origem de diversidade orgânica atrelados, principalmente, às diversas condições ambientais; discussões e reflexões de que fenótipos diferentes podem ser gerados pela mudança de temperatura, presença de predadores, sazonalidade, densidade demográfica da espécie; conclusão de que a expressão gênica é subjacente a circunstâncias ambientais e que o ambiente tem um efeito profundo no fenótipo do animal, ou seja, tudo que é necessário para um fenótipo não está empacotado no ovo fertilizado.

Problema 4

Sean Carroll – um biólogo norte-americano que se dedica aos estudos da Biologia Evolutiva do Desenvolvimento – em livro intitulado *Infinitas formas de grande beleza: Como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam nosso planeta* (2006), faz menção à tamanha ubiquidade de formas orgânicas, decorrentes do processo evolutivo e dos mecanismos envolvidos nesse processo.

O âmago das objeções contemporâneas ao corpo teórico-conceitual da Teoria Sintética é o DNA-centrismo que caracteriza essa teoria, já que os mecanismos de mutação, deriva genética e seleção natural podem não ser os únicos responsáveis pela origem de toda diversidade conhecida no planeta.

Com base nas questões anteriores e nessa crítica direcionada à Teoria Sintética, como você explicaria o sentido da palavra forjar apresentada no título do livro?

Objetivo/justificativa: levantamento de hipóteses sobre as possíveis relações entre a crítica ao DNA-centrismo e os diversos mecanismos que possibilitam a origem de diversidade orgânica; discussão sobre o sentido do emprego da palavra forjar no contexto evolutivo (que pode ter por base os dois problemas anteriormente apresentados); proposição de um ponto de vista inclusivo sobre os diversos mecanismos existentes e participantes do processo evolutivo que possibilitam a geração de diversidade orgânica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste artigo foi apresentar uma tentativa de articulação entre a epistemologia e a didática da Biologia, a partir do uso do ensino por investigação como estratégia didática e metodológica que facilita a abordagem integrada da biologia e da (re)construção dos conceitos biológicos em contextos diferentes de produção de conhecimento.

O uso da SEI para elaboração de uma sequência fundamentada em pressupostos da Biologia Evolutiva contemporânea permitiu uma articulação inicial entre didática e epistemologia, uma vez que o estudo da epistemologia referente à evolução biológica irrogou a necessidade de inserirmos uma abordagem pluralista e integrada ao entendimento dos processos evolutivos na formação inicial de pesquisadores e professores de Biologia. Essa articulação apresenta um potencial heurístico que pode auxiliar os alunos a entenderem o conhecimento biológico de forma mais complexa e integrada, já que o conjunto de problemas propostos está baseado em dois pontos principais: o entendimento e a reflexão sobre a natureza integrada das ciências biológicas e a pesquisa e a interpretação de texto por parte dos alunos.

A evolução biológica é o eixo integrador do conhecimento biológico e traduz as intrincadas relações estabelecidas entre os diferentes níveis biológicos. No entanto, a participação sincrônica gene-organismo-ambiente na geração de diversidade de formas orgânicas fica

reduzida, na maioria das vezes, apenas aos engendramentos genéticos. Pensar em como os resultados do estudo da epistemologia podem ser um subsídio para o planejamento didático-metodológico do professor é um caminho para que o entendimento da natureza das ciências biológicas seja frutífero e exequível nas aulas de Biologia.

REFERÊNCIAS

ABOUHEIF, Ehab; FAVÉ, Marie-Julie; IBARRARÁN-VINIEGRA, Ana Sofia; LESOWAY, Marina P.; RAFIQI, Ab Matteen; RAJAKUMAR, Rajendhran. Evo-evo-devo: the time has come. In: LANDRY, Christian R.; AUBIN-HORTH, Nadia (Ed.). *Ecological genomics: ecology and evolution of genes and genomes*. New York: Advances in Experimental Medicine and Biology 781: Springer Science, 2014.

ALMEIDA, Ana Maria Rocha; EL-HANI, Charbel Niño. Um exame histórico-filosófico da biologia evolutiva do desenvolvimento. *Scientiae Studia*, v. 8, n. 1, p. 9-40, 2010.

AZEVEDO, Maria Cristina P. Stella. de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, Ana. Maria Pessoa (Org.). *Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática*. São Paulo: Pioneira, 2004. p. 19-33.

CARROLL, Sean B. *Infinitas formas de grande beleza: como a evolução forjou a quantidade de criaturas que habitam o planeta*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006.

CARVALHO, Ana Maria Pessoa. Ensino e aprendizagem de ciências: referenciais teóricos e dados empíricos das sequências de ensino investigativo (SEI). In: LONGHINI, Marcos D. (Org.). *O uno e o diverso na educação*. Uberlândia: EDUFU, 2011.

CESCHIM, Beatriz; OLIVEIRA, Thais Benetti de; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. Evo-devo e o ensino de evolução: uma análise de conteúdo acerca dessa relação em alunos de um curso de licenciatura em Ciências Biológicas. In: ENCONTRO DE HISTÓRIA E FILOSOFIA DA BIOLOGIA, 2014, Ribeirão Preto, *Caderno de Resumos*. Ribeirão Preto: Filosofia/USP, 2014. p. 212-216.

EL-HANI, Charbel N.; MEYER, Diogo. A evolução da Teoria Darwiniana. *ComCiência*, n. 107, p. 1-4, 2009.

GELLON, Gabriel; MCGINNIS, William. Shaping animal body plans in development and evolution by modulation of Hox expression patterns. *BioEssays*, v. 20, n. 2, p. 116-125, 1998.

GILBERT, Scott F.; EPEL, David. *Ecological developmental biology*, Sunderland: Sinauer Associates, 2009.

JABLONKA, Eva; LAMB, Marion J. *Evolução em quatro dimensões: DNA, comportamento e a história da vida*. Tradução de Claudio Angelo. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

JARVELA, Alvs M. Cheatle; PICK, Leslie. Evo-Devo: discovery of diverse mechanisms regulating development. *Current Topics in Developmental Biology*. Academic Press, 2016. p. 253-274.

JUNQUEIRA, L. C.; CARNEIRO, J. *Biologia celular e molecular*. 9. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.

LEDÓN-RETTIG, Cris C.; PFENNIG, David W. Emerging model systems in Eco-Evo-Devo: the environmentally responsive spadefoot toad. *Evolution & Development*, v. 13, n. 4, p. 391-400, 2011.

LEWONTIN, Richard. *A tripla hélice: gene, organismo ambiente*. Tradução de Alberto de Vasconcelos. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

LOFEU, Leandro; KOHLSDORF, Tiana. Mais que seleção: o papel do ambiente na origem e evolução da diversidade fenotípica. *Genética na Escola*, v. 10, n. 1, p. 11-19, 2015.

MÜLLER, Gerd B. Evo-Devo: extending the evolutionary synthesis. *Nature Reviews Genetics*, v. 8, n. 12, p. 943, 2007.

NIJHOUT, Frederick H. *The developmental and evolution of butterfly wing patterns*. Washington: Smithsonian Institution Press, 1991.

NUÑEZ, Isauro Beltran *et al.* O uso de situações-problema no ensino de ciências. In: NUÑEZ, Isauro Beltran; RAMALHO, Betania L. (Org.). *Fundamentos do ensino-aprendizagem das ciências naturais e da matemática: o novo Ensino Médio*. Porto Alegre: Sulina, 2004.

OLIVEIRA, T. B. D. *Uma pesquisa didático-epistemológica na formação inicial em ciências biológicas: “como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam o nosso planeta”?*. 2015. 209 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus Bauru, São Paulo, 2015.

OÑORBE, Pedrinaci, A. Resolución de problemas. In: ALEXANDRE, María Pilar J. (Org.). *Enseñar ciencias*. Barcelona: Ed. Grao, 2003.

PERALES, Francisco J. *Resolución de problemas*. Madrid: Editora Síntesis, 2000.

PIGLIUCCI, Massimo. Do we need an extended evolutionary synthesis?. *Evolution*, v. 61, n. 12, p. 2.743-2.749, 2007.

POZO, Juan I.; CRESPO, Miguel A. G. A solução de problemas nas ciências da natureza. In: POZO, Juan I. (Org.). *A solução de problemas: aprender a resolver, resolver para aprender*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1998.

REECE, J. B.; URRY, L. B.; CAIN, M. L.; WASSERMAN, S. A.; MINORSKY, P. V.; JACKSON, R. B. *Biologia de Campbell*. Tradução de Anne D. Villela et al. Porto Alegre: Artmed, 2015.

SOLINO, Ana Paula; GEHLEN, Simoni Tormöhlen. Abordagem temática freireana e o ensino de ciências por investigação: possíveis relações epistemológicas e pedagógicas. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 19, n. 1, p. 141-162, 2016.

ZÔMPERO, Andreia Freitas; LABURÚ, Carlos Eduardo. Atividades investigativas de ciências: aspectos históricos e diferentes abordagens. *Revista Ensaio*, v. 13, n. 3, p. 67-80, 2011.

Thais Benetti de Oliveira

Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, campus de Bauru (UNESP-Bauru). Possui mestrado, doutorado e pós-doutorado em Educação para Ciência, também pela UNESP-Bauru, onde é membro do grupo de pesquisa em Epistemologia da Biologia. É professora titular da Universidade do Sagrado Coração (USC).

thaisbbbp@hotmail.com

Beatriz Ceschim

Graduada em Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), mestra e doutoranda em Educação para Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência da Faculdade de Ciências da UNESP-Bauru.

beatriz_ceschim@hotmail.com

Ana Maria de Andrade Caldeira

*Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP-Bauru), e em Pedagogia pela Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Botucatu, mestra em Agronomia – Genética e Melhoramento de Plantas pela Universidade de São Paulo e doutora em Educação pela UNESP. É professora adjunta no Departamento de Educação da Faculdade de Ciências da UNESP-Bauru, credenciada nos Programas de Pós Graduação em Educação para Ciência e Docência para Educação Básica. Líder do Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB).
anacaldeira@fc.unesp.br*